

TRAITÉ DE GESTION DE L'ENVIRONNEMENT TROPICAL

Pr Michel Maldague

TOME I

DÉVELOPPEMENT INTÉGRÉ DES RÉGIONS TROPICALES

Approche systémique - Notions - Concepts - Méthodes

Fascicule I - 10

*Le deuxième principe de la thermodynamique et la gestion de la biosphère
Applications à l'environnement et au développement*

Place du fascicule

Le fascicule I - 9 avait pour objet l'analyse du concept de développement rural intégré. Nous y avons annoncé le fascicule I - 12 qui portera sur *l'analyse systémique*, base solide pour mettre en œuvre l'approche intégrée. Mais pour aborder ce fascicule-clé, dans les meilleures conditions de compréhension, il convient de passer en revue des notions de base particulièrement appropriées pour saisir le bien-fondé, la portée et la nécessité de l'approche systémique, à savoir des notions de thermodynamique. Cette discipline scientifique apporte de la rigueur dans l'appréhension des problèmes environnementaux, rigueur qui, faut-il le dire, fait souvent défaut dans le langage « écologiste », voire même écologique ; nous avons fait références — sans les expliquer — aux notions d'entropie et de néguentropie, au fascicule I - 2, pour expliquer le mécanisme fondamental des cycles géo-physico-biotiques tropicaux (cf. fig. 2 - 5).

Chose curieuse, même si les références à la physique semblent souvent rebutantes, beaucoup connaissent la fameuse loi de Einstein, alors que pratiquement tout le monde ignore ou a complètement oublié la deuxième loi (ou principe) de la thermodynamique et la notion d'entropie. Or, ces notions gouvernent tous les aspects — vivants et non vivants — de la réalité et de l'évolution des choses. En revanche, la notion d'entropie retient, à l'heure actuelle, l'attention non seulement des physiciens, mais encore de sociologues [Edgard Morin, p.ex.] et de philosophes [comme Henri Guitton, de l'Institut]. L'entropie, de par son caractère universel, est le commun dénominateur de tous les domaines de la pensée. De fait, le deuxième principe, enrichi des découvertes de Prigogine, Prix Nobel de Chimie, ouvre d'innombrables pistes, car il s'applique tant à l'énergie, qu'à la matière (cf. au fasc. I - 9, les applications à l'érosion des sols et aux feux de brousse) et même à la pensée. L'application du 2^e principe aux questions écologiques et environnementales confère à ces domaines de la rigueur. Rien de tel pour comprendre valablement le *concept de développement durable* que de substituer à son approche politique, l'approche thermodynamique, ce qui fera l'objet du fascicule I - 11.

Il faut encore noter la cohérence qu'il y a entre les lois de la biocénotique fondamentale, les lois de l'analyse des systèmes et les lois de la thermodynamique. Il y a là un nœud conceptuel fort qui devrait servir de pilier, d'armature ou de toile de fond à toute décision politique et à toute stratégie d'aménagement et de gestion. Enfin, il ne faut pas avoir des connaissances poussées en physique pour comprendre ces notions de base. •

Table des matières

1. Introduction, 10 - 3
2. Considérations préliminaires, 10 - 3

- I. PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE, 10 - 4**
 - I.1 Énergie calorifique et premier principe ou principe de conservation de l'énergie, 10 - 4
Rendement d'une machine thermique, 10 - 5
 - I.2 Entropie et deuxième principe de la thermodynamique, 10 - 6
Fig. 10 - 1. Illustration du 2e principe de la thermodynamique : évolution spontanée vers l'état le plus probable, 10 - 6
Équation de Boltzmann, 10 - 7
 - I.3 Troisième principe de la thermodynamique, 10 - 8
 - I.4 Énergie libre, 10 - 8
Nature isotherme des phénomènes cellulaires, 10 - 8
Énergie libre, 10 - 8
Énergie libre et énergie liée, 10 - 9
Fig. 10 - 2. Application du deuxième principe à la combustion d'un morceau de charbon, 10 - 9

- II. APPLICATION DU DEUXIÈME PRINCIPE, 10 - 10**
 - II.1 Puissance du désordre et cohérence locale, 10 - 10
 - II.2 Application aux organismes vivants. Notion de néguentropie, 10 - 10
Biosphère, 10 - 10
Indétermination entropique, 10 - 11
Néguentropie, 10 - 11
 - II.3 Entropie et processus économique, 10 - 11
 - II.4 Extension de la notion d'entropie, 10 - 12
 - II.4.1 Interprétation thermodynamique des processus érosifs, 10 - 12
Fig. 10 - 3. Application du deuxième principe de la thermodynamique à l'érosion du sol ; le sol, une fois érodé, n'est plus utilisable, 10 - 13
 - II.4.2 Interprétation thermodynamique d'un feu de graminées, 10 - 13
Fig. 10 - 4. Application du deuxième principe aux feux de brousse, 10 - 14
 - II.4.3 Information et deuxième principe, 10 - 14

- III. APPLICATION DE LA THERMODYNAMIQUE À LA CRISE DE L'ENVIRONNEMENT, 10 - 14**
 - III.1 Introduction, 10 - 14
Stock et flux, 10 - 15
 - III.2 Thermodynamique et écologie, 10 - 15
 - III.3 Aspects thermodynamiques de la dégradation de la biosphère, 10 - 16
 - III.4 Exploitation des sources d'énergie conventionnelle, 10 - 17
 - III.5 Impacts sur les transformateurs d'énergie solaire, dégradation des mécanismes néguentropiques, 10 - 17
 - III.5.1 Destruction directe des grands transformateurs naturels d'énergie, 10 - 18
 - III.5.2 Destruction indirecte des grands transformateurs naturels d'énergie et impact sur le climat du globe, 10 - 19
 - III.5.2 Dysfonctionnement des systèmes artificialisés par absence de recyclage, 10 - 18
 - III.6 Conclusion, 10 - 20 •

Fascicule 10

**LE DEUXIÈME PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE ET
LA GESTION DE LA BIOSPHÈRE**

Applications à l'environnement et au développement

1. Introduction

1. La connaissance des principes physiques qui régissent les transformations de l'énergie sont utiles pour bien comprendre : les aspects énergétiques des écosystèmes et leur rôle dans la conservation de l'équilibre biosphérique ; les implications du concept de développement durable ; la portée thermodynamique de l'épuisement des combustibles fossiles, de la destruction des forêts, de l'érosion des sols et des feux de brousse ; la signification de la gestion rationnelle des ressources et de l'aménagement du territoire ; le fonctionnement des forêts tropicales ; etc.

2. Le deuxième principe de la thermodynamique est une loi fondamentale. Il peut aussi être considéré comme une *règle méthodologique* de base à laquelle devraient être subordonnés tout plan, tout projet, toute opération d'aménagement, toute stratégie de développement. La question qui se pose dans tous ces cas est la suivante : dans quel sens aura évolué l'entropie du système après l'intervention prévue ? Le deuxième principe est cohérent avec les concepts et les lois de la systémique ainsi qu'avec les lois fondamentales de la biocénologie.

Avant d'aborder les implications du deuxième principe dans les questions d'environnement, d'aménagement et de développement, il est indispensable de faire quelques rappels de thermodynamique (1).

2. Considérations préliminaires

3. Tous les événements du monde physique se conforment aux deux principes fondamentaux de la thermodynamique et sont déterminés par ces deux principes :

- **Premier principe** ou principe de conservation de l'énergie : l'énergie totale de l'univers demeure constante.
- **Deuxième principe** : l'entropie de l'univers augmente.

En 1865, Clausius donne des deux principes de thermodynamique un énoncé cosmologique désormais fameux (2) :

*Die Energie des Welt ist konstant.
Die Entropie des Welt strebt einem Maximum zu.*

(1) Le lecteur que ces rappels rebuteraient pourrait passer directement au paragraphe 14, *Entropie et deuxième principe de la thermodynamique*.

(2) Cité par Prigogine et Stengers, *La nouvelle alliance. Métamorphose de la science*. Gallimard, 1979 ; extrait cité, p. 189. Traduction : l'énergie de l'univers est constante ; l'entropie de l'univers tend vers un maximum.

I. PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE

4. On désigne sous le nom de *système* l'ensemble matériel isolé à l'intérieur duquel se produisent des variations d'énergie au cours d'un processus physique ou chimique donné (3). Toute matière autre que celle de ce système s'appelle le milieu extérieur ou l'environnement du système.

5. Le contenu énergétique total du système isolé, avant le phénomène, désigne son *état initial*, et, après le phénomène, son *état final*.

Pour décrire le contenu énergétique total de tout système isolé, il faut définir les paramètres qui caractérisent ce système : pression, volume, température, composition chimique, contenu calorifique, etc., au moyen d'une équation dite *équation d'état*. En passant de l'état initial à l'état final, le système peut recevoir de l'énergie du milieu extérieur, ou libérer de l'énergie dans ce milieu. La variation d'énergie du système entre l'état initial et l'état final doit être contrebalancée par une variation inverse de l'énergie du milieu extérieur.

Trois aspects de l'énergie doivent retenir l'attention : 1° l'énergie interne ; 2° l'entropie ; 3° l'énergie libre.

I.1 Énergie calorifique et premier principe ou principe de conservation de l'énergie

6. Lorsqu'un phénomène se traduit par une perte de chaleur en faveur du milieu extérieur, il est dit *exothermique* ; lorsqu'il se traduit par une absorption de chaleur, il est dit *endothermique*. La chaleur est un moyen de transférer l'énergie, mais un tel transfert ne peut s'opérer que s'il existe une différence de température entre le système et le milieu environnant, car la chaleur ne peut s'écouler que d'un corps chaud vers un corps froid, conformément au principe de Carnot-Clausius.

Énergie interne (E)

7. Soit un système isolé contenant une quantité donnée d'énergie. Si nous augmentons sa chaleur d'une certaine quantité q , il faut, selon le principe de conservation de l'énergie, que l'augmentation de chaleur du système se retrouve dans l'augmentation ΔE (Δ , variation) de l'énergie interne du système, ou dans la quantité de travail (w) exécutée par le système sur le milieu extérieur :

$$q = \Delta E + w$$

soit, sous une forme plus courante :

$$\Delta E = q - w$$

C'est l'équation fondamentale du premier principe. « *La conservation d'une grandeur physique, l'énergie, à travers les transformations que peuvent subir les systèmes physiques, chimiques, biologiques va (...) être mise à la base de ce que nous pouvons appeler la science du complexe (4) ».*

(3) Albert Lehninger, *Bioénergétique*. Édition française, dirigée par J. et M. Duquesne. Paris, Ediscience, 1969.

(4) Ilya Prigogine et Isabelle Stengers, *op. cit.*, p. 173. - Note : Ilya Prigogine, Professeur à l'Université Libre de Bruxelles, a reçu le prix Nobel de chimie en 1977 pour ses contributions à la thermodynamique de non-équilibre, en particulier la théorie des structures dissipatives.

8. Joule a montré qu'il existe une équivalence entre la chaleur (q) et le travail (w). C'est ce que l'on appelle *l'équivalent mécanique de la chaleur* : 1 cal/g d'énergie calorifique est l'équivalent de 4,185 joules (J). Mais, alors que le travail mécanique peut se convertir *intégralement* en chaleur, la conversion de la chaleur en travail mécanique n'est *jamais* totale. On peut dire que la chaleur est taxée, mais pas le travail.

Rendement d'une machine thermique

9. On sait que le travail maximal w que l'on peut tirer d'une machine thermique est donné par l'équation :

$$w = q [(T_2 - T_1) / T_2]$$

où q , est la quantité de chaleur absorbée ; T_2 , la source chaude, par exemple la température de la vapeur à l'entrée du cylindre d'une machine à vapeur ; T_1 , la source froide, par exemple la température de la vapeur à l'échappement. T_1 et T_2 sont les températures absolues des corps matériels entre lesquels il y a échange de chaleur. On observe, d'après cette relation, que l'on ne peut tirer de la chaleur un maximum d'efficacité dans l'exécution d'un travail que s'il existe une différence de température infiniment grande entre les deux sources ; plus la différence de température est faible, moins la machine thermique est efficace.

10. Une machine à vapeur ne pourrait effectuer la conversion totale de la chaleur en travail que si la température de la vapeur à l'échappement était 0 °K.

Enthalpie (H)

11. Dans les réactions chimiques à pression constante, la variation (V) de chaleur q s'appelle aussi la variation d'enthalpie, désignée par VH ; dans ces conditions, on a alors :

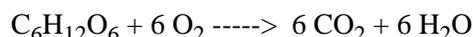
$$q = VH$$

Dans les conditions de pression constante, l'équation fondamentale du premier principe peut dès lors s'écrire, en remplaçant q par la variation d'enthalpie :

$$VE = VH - w$$

12. La variation VH de l'enthalpie d'une réaction chimique se mesure par la calorimétrie directe.

Exemple : l'équation de combustion du glucose s'écrit :



La chaleur, libérée au cours de cette oxydation, va élever la température de l'eau du calorimètre. Une telle mesure permet de déterminer l'enthalpie molaire de la combustion du glucose :

$$VH = - 673.000 \text{ cal/mole.}$$

Le signe négatif signifie qu'au cours de la combustion, il y a perte de chaleur du système (le glucose) au profit du milieu extérieur.

13. Si la réaction se produit non seulement à pression constante, mais aussi à volume constant (sans production de travail [$w = 0$]), on obtient :

$$VE = VH$$

I.2 Entropie et deuxième principe de la thermodynamique

Direction des phénomènes

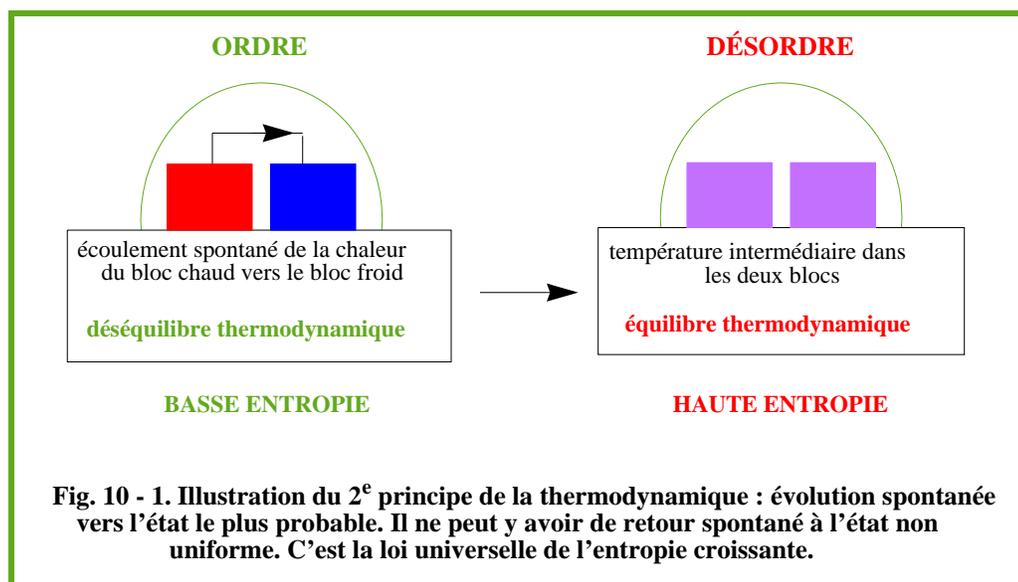
14. Supposons que l'on dispose de deux blocs de cuivre, l'un chaud, l'autre froid, enfermés ensemble dans une enceinte close (voir fig. 10 - 1). On observe que la température du bloc chaud va baisser, et celle du bloc froid s'élever, jusqu'à ce que les deux blocs atteignent une température intermédiaire qui sera uniforme, une fois l'équilibre atteint dans l'ensemble des deux blocs. L'écoulement de la chaleur, et par conséquent de l'énergie, du bloc chaud au bloc froid, est *spontané*.

Cet exemple montre que les modifications physiques ou chimiques ont une direction : tous les systèmes tendent à atteindre des états d'équilibre où la température, la pression et tous les autres paramètres d'état deviennent complètement uniformes. Une fois atteint cet équilibre, ils ne reviennent pas spontanément à l'état non uniforme, ou de « *non-hasard* ». Lorsque, dans l'exemple choisi, les deux blocs ont atteint exactement la même température, la distribution de l'énergie est parvenue au degré le plus élevé de *désordre*.

Entropie

15. L'entropie est l'état désordonné de l'énergie, incapable de fournir un travail. L'entropie est le hasard ou le désordre.

Le *second principe de la thermodynamique* stipule que tous les phénomènes physiques et chimiques évoluent de telle façon que l'entropie du système devient maximum ; il y a alors équilibre. Le second principe établit encore que l'entropie ou le désordre de l'univers augmente toujours, suivant une évolution irréversible ; en aucun cas, il ne se produit une diminution de l'entropie de l'Univers. Il en résulte que l'énergie totale de l'Univers subit une dégradation constante vers une forme qui ne peut plus effectuer de travail.



« Le sort ultime de l'univers est donc d'atteindre un état parfaitement désordonné, soumis à ce que l'on a appelé la loi inexorable de l'entropie » (5). Une autre façon de définir l'entropie est de dire que l'énergie utilisable est continuellement transformée en énergie inutilisable jusqu'à ce qu'elle disparaisse complètement. « Toutes les formes d'énergie sont graduellement transformées en chaleur et la chaleur en

(5) Cf. Lehninger, *op. cit.*, p. 26.

fin de compte devient si diffuse que l'homme ne peut plus l'utiliser (6) ».

*Équation de Boltzmann :

$$S = k \cdot \log W$$

16. L'équation de Boltzmann est fondamentale en thermodynamique parce qu'elle établit une relation entre l'entropie (S) et le désordre (W) ; k est la constante de Boltzmann. Le second membre de l'équation comprend une quantité qui est relative au désordre ; elle mesure à quel point l'énergie est dispersée. W représente le nombre de façons différentes suivant lesquelles des atomes peuvent être arrangés dans un système sans qu'un observateur extérieur s'aperçoive qu'un changement a eu lieu (7). Cette équation exprime les concepts de dispersion et de détérioration de l'énergie. La dispersion de l'énergie — et sa détérioration — s'accompagne d'une augmentation de l'entropie. Il est équivalent de dire que « l'énergie tend à se disperser » ou que « l'entropie tend à augmenter (8) ». Sur la tombe de Boltzmann, au Cimetière central de Vienne, on lit sa célèbre formule.

17. Supposons un système isolé, à l'état initial. Il contient une énergie concentrée et ordonnée, de qualité parfaite ; ce système n'admet qu'une seule configuration, c'est-à-dire que :

$$W = 1 ; \log 1 = 0, \text{ et } S = 0 ; \text{ l'entropie de ce système est nulle.}$$

18. Dans le cas de l'univers constitué de deux systèmes ou blocs de cuivre [l'un, initialement, chaud, et, l'autre, initialement froid], une fois atteint l'équilibre thermique [état final, caractérisé par l'égalisation de la température des deux blocs], l'entropie est maximale. À l'équilibre thermique, les systèmes semblent donc au repos, mais en fait, il s'agit d'un équilibre dynamique : le mouvement interne se poursuit. En d'autres termes, la « vie atomique » persiste dans des systèmes qui paraissent globalement morts. L'équilibre thermique correspond au maximum d'entropie de l'univers [formé des deux blocs de cuivre] ; il représente l'état thermodynamique dont il existe le plus de configurations atomiques (nombre W) ; c'est aussi l'état le plus probable. De ce point de vue, la répartition uniforme de l'énergie correspond à l'état de l'univers le plus probable. En d'autres termes, c'est l'équilibre thermique qui correspond à l'état le plus probable de l'univers (9). Une fois que l'univers atteint l'un des états les plus probables, il ne retourne presque jamais à un état moins probable, parce que la probabilité d'y parvenir par le seul jeu du hasard est beaucoup trop faible.

19. En ce qui concerne l'Univers réel, les propriétés sont absolument analogues. L'énergie, pouvant se disperser de tellement de façons différentes, des structures extraordinaires peuvent surgir et paraître stables, tandis que l'Univers glisse, en fait, quasi inéluctablement vers l'équilibre. Les systèmes évoluent d'une manière essentiellement *statistique*. À cet égard, l'irréversibilité des phénomènes naturels n'est pas absolument certaine, mais seulement extrêmement probable. Les phénomènes que nous percevons correspondent à l'évolution de l'Univers vers des états de plus en plus probables, le dernier étant le plus «stable» ; en principe, les miracles sont possibles. « *Ce serait (...) une sorte de miracle si, soudain, un morceau de métal s'échauffait de lui-même au rouge ou si de l'eau se changeait spontanément en vin. (...) de l'eau peut se changer en vin, mais la probabilité d'un tel changement est ridiculement faible* (10). »

« *D'un point de vue probabiliste, les comptes rendus de miracles sont sans doute plus le résultat d'exagérations, de rumeurs incontrôlées, d'hallucinations, de tromperies, de malentendus ou de simples*

(6) Nicholas Georgescu-Roegen, *Demain la décroissance. Entropie, écologie, économie*. Collection "En question" de Jacques Bofford. Lausanne, Éditions Pierre Marcel Favre, 1979, 157 p. Cf., p. 47.

(7) Cf. Atkins, *Chaleur et désordre. Le deuxième principe de la thermodynamique*. L'univers des sciences. Paris, Pour la science, Diffusion Belin, 1984, 214 p. Cf. p. 68.

(8) *Ibid.*, p. 71.

(9) *Ibid.*, p. 73.

(10) *Ibid.*, p. 75.

trucs, que de miracles réels (11) ».

I.3 Troisième principe de la thermodynamique

20. Le troisième principe enseigne que l'entropie d'un cristal parfait d'un élément ou d'un composé, au zéro absolu, est nulle. Au zéro absolu, comme il n'existe pas de mouvement thermique, les atomes d'un cristal parfait seraient rangés dans un ordre lui-même absolument parfait. Tout état moins ordonné d'un tel cristal possède alors une quantité finie d'entropie.

I.4 Énergie libre

Nature isotherme des phénomènes cellulaires

21. La chaleur est le moyen le plus simple de transférer l'énergie dans les machines construites par l'homme (machines thermiques). La chaleur n'est cependant pas utilisée dans ce but dans les systèmes biologiques. Ceci est dû au fait que les organismes vivants sont essentiellement *isothermes* (il n'y a pas de différences de température sensibles entre les diverses parties d'une cellule). De fait, les cellules ne fonctionnent pas comme des machines thermiques : il ne leur est pas possible de faire circuler la chaleur d'un corps chaud à un corps froid. C'est le *principe de l'isothermicité*.

22. S'il n'y a pas de différence de température — cas des cellules vivantes —, la chaleur ne peut pas se transformer en travail. Dès lors, pour comprendre comment la cellule exécute du travail dans des conditions isothermes, il faut faire appel à l'énergie libre (G).

Énergie libre (VG)

23. L'élément moteur de tous les phénomènes est la tendance à rechercher la position d'entropie maximum. Les variations de chaleur et d'entropie sont liées par une relation qui définit un troisième aspect de l'énergie, l'*énergie libre* (VG), du nom de Josiah Willard Gibbs (1839-1903). L'énergie libre est la composante de l'énergie totale d'un système, capable d'effectuer un travail dans des conditions isothermes. Tandis que l'entropie augmente au cours des transformations irréversibles, l'énergie libre diminue, et cela jusqu'à atteindre un état d'équilibre où l'énergie libre du système est minimum et son entropie maximum.

24. L'énergie libre est une *énergie utilisable*, tandis que l'entropie est une *énergie dégradée*. Pratiquement, l'énergie libre sert à prévoir l'énergie fournie par une réaction ; elle permet aussi de caractériser la spontanéité des réactions. En particulier, si l'énergie libre diminue, au cours d'une réaction, c'est que la réaction peut se produire spontanément dans ce sens. En termes plus simples, les réactions chimiques ont tendance à se produire spontanément, dans le sens d'une diminution de l'énergie libre.

25. L'équation fondamentale qui relie les variations de l'entropie (VS) et de l'enthalpie (VH) [ou chaleur échangée entre le système et le milieu extérieur dans les réactions chimiques à pression constante] aux variations de l'énergie libre (VG) est :

$$VG = VH - T VS, \text{ où}$$

T est la température absolue.

Une diminution de VG s'accompagne d'une augmentation de T VS ; cependant ces quantités ne sont égales (mais de signes contraires) que s'il n'y a pas eu d'échange de chaleur entre le système et le milieu

(11) *Ibid.*, p. 75.

extérieur.

* *Exemple*

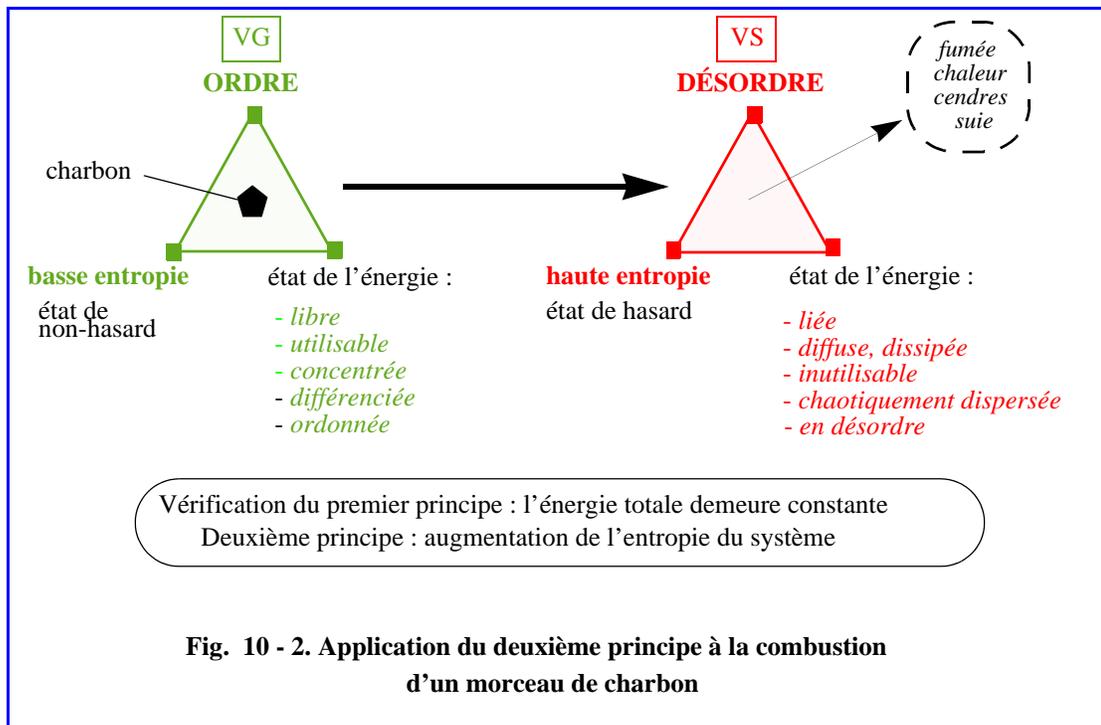
26. L'énergie chimique contenue dans un morceau de charbon est de l'énergie libre (VG) que l'homme peut transformer en chaleur (q) ou en travail mécanique (w) (fig. 10 - 2). Le charbon est une matière énergétique de « *basse entropie* ». Lorsqu'on brûle un morceau de charbon, son énergie chimique ne subit ni diminution ni augmentation (conformément au premier principe). Mais son énergie libre initiale (VG) s'est tellement dissipée sous forme de chaleur, de fumée, de suie et de cendres que l'homme ne peut plus l'utiliser. Elle s'est dégradée en énergie liée (12) ; l'énergie liée est de l'énergie chaotiquement dissipée. L'énergie libre implique une structure ordonnée, un ordre, tandis que l'énergie liée est de l'énergie dispersée, de l'énergie en désordre.

Énergie libre et énergie liée

27. L'énergie peut être divisée :

- en énergie utilisable ou énergie libre (basse entropie), qui peut être transformée en travail mécanique ;
- et en énergie inutilisable ou liée (haute entropie), qui ne peut pas être ainsi transformée (13).

Pour être utilisable, l'énergie doit être répartie de façon inégale ; l'énergie qui est complètement dissipée n'est plus utilisable. À cet égard, l'entropie peut être définie comme un indice de la quantité d'énergie inutilisable contenue dans un système thermodynamique donné à un moment donné de son évolution.



(12) *Ibid.*, p. 21.

(13) *Ibid.*, p. 46.

II. APPLICATION DU DEUXIÈME PRINCIPE

II.1 Puissance du désordre et cohérence locale

Apparition de cohérences locales

28. Les changements spontanés de l'Univers le font inexorablement glisser vers des états de plus en plus probables, sans que l'évolution inverse soit possible. Cependant un état plus probable, donc plus désordonné, peut être à l'origine d'une *cohérence locale*, dans la mesure où une dissipation supérieure apparaît ailleurs. Des machines complexes permettent effectivement de récupérer un mouvement cohérent à partir de l'agitation incohérente. Une découverte géniale est à l'origine de la conception mécanique d'un moteur : la réponse directionnelle (mouvement cohérent) du piston aux impacts (agitation incohérente). En d'autres termes, le moteur sélectionne les mouvements des particules qu'il contient.

« *Le moteur assure la transformation du mouvement d'agitation thermique des particules de gaz, en mouvement cohérent des particules du piston (et de tous les éléments auxquels le piston est relié)* (14) ».

29. Une fois le cycle accompli, le monde n'est plus tout à fait le même : de l'énergie a quitté la source chaude; une partie a été transformée en travail (W) et le reste s'est déversé dans la source froide. Le travail a pu servir à soulever des briques, du ciment, des poutrelles, par exemple, à édifier l'une ou l'autre construction. Ce qui est important de saisir, c'est que cet édifice a été construit grâce à une destruction.

II.2 Application aux organismes vivants. Notion de néguentropie

30. On se trouve ici dans le domaine de la thermodynamique de non-équilibre. Prigogine écrit : « (...) *au sein d'un système qui évolue globalement vers l'équilibre — et nous pouvons dire, par exemple, que c'est le cas du système planétaire dans son ensemble —, les flux irréversibles peuvent créer, de manière prévisible et reproductible, la possibilité de processus locaux d'auto-organisation.* » (15)

Nous donnons, plus loin un exemple d'une telle création de processus locaux d'auto-organisation — ou d'apparition de cohérences locales —, en appliquant le deuxième principe aux feux de brousse.

31. Tout organisme vivant s'efforce, en effet, de maintenir constante sa propre entropie — son ordre — en puisant dans son environnement de la basse entropie (néguentropie) afin de compenser l'augmentation de l'entropie, à laquelle son organisme est sujet, comme toute autre structure matérielle. L'entropie du système total [organisme + son environnement] ne peut que croître.

« *Pratiquement tous les organismes vivent de basse entropie trouvée dans leur environnement naturel (...) L'homme est l'exception la plus flagrante : il cuit la plus grande partie de sa nourriture et transforme aussi les ressources naturelles en travail mécanique ou en divers objets d'utilité* (16) ». Pour ce faire, l'homme contribue à l'augmentation de l'entropie de l'univers de façon plus ou moins considérable, suivant ses capacités technologiques.

Biosphère ($VG_B > 0$)

32. Si nous considérons la biosphère (B) sans inclure le soleil (S), nous aurons l'impression d'une

(14) Cf. P.W. Atkins, *op. cit.*, p. 83.

(15) Prigogine *et al.*, *op. cit.*, p. 215. - Prigogine écrit (cf. *Ibid.*, p. 263), à propos de l'ordre par fluctuation (en regard du hasard et de la nécessité de J. Monod) : « *Le vivant fonctionne, loin de l'équilibre, dans un domaine où les conséquences de la croissance de l'entropie ne peuvent plus être interprétées selon le principe d'ordre de Boltzmann, il fonctionne dans un domaine où les processus producteurs d'entropie, les processus qui dissipent l'énergie, jouent un rôle constructif, sont source d'ordre* ».

(16) N. Georgescu-Roegen, *op. cit.*, p. 24.

accumulation considérable d'énergie libre ($VG_B > 0$) — sous forme de carburant et de biomasse vivante, par exemple —, caractérisée par un énorme γG positif (17). Mais lorsque nous ajoutons le VG négatif, encore plus énorme, associé à la fourniture de lumière solaire (soleil : $VG_S < 0$) — énergie de haute qualité — aux organismes photosynthétiques, on voit que le second principe de la thermodynamique n'est pas violé, car :

$$VG_B + VG_S < 0.$$

Indétermination entropique

33. La loi de l'entropie est la seule loi physique dont la prédiction n'est pas quantitative. Il existe ainsi dans le monde une *indétermination entropique* qui permet à la vie de se développer, selon une infinité de formes, et, à la plupart des activités de l'organisme vivant, de jouir d'une certaine marge de liberté(18). C'est aussi en raison de l'indétermination entropique que la vie n'est pas sans importance pour le processus entropique. En effet, certains organismes ralentissent la dégradation entropique.

Néguentropie

34. Les plantes vertes (organismes autotrophes) emmagasinent, grâce à la chlorophylle, une partie(19) du rayonnement solaire qui autrement serait irrémédiablement dissipée en chaleur (haute entropie). Par suite de leur capacité à réactiver la matière inerte — éléments minéraux (avec $VS > 0$), transformés en substances chimiques (avec $VG > 0$) (c'est la photosynthèse) —, les végétaux constituent un *mécanisme néguentropique*. Les plus grands mécanismes néguentropiques de la biosphère sont les forêts tropicales (voir fig. 2 - 2). Tous les autres organismes vivants, au contraire, accélèrent la marche de l'entropie. À cet égard, précise Georgescu-Roegen, l'homme occupe la position la plus élevée. C'est de là que surgissent tous les problèmes d'environnement.

II.3 Entropie et processus économique

35. D'un point de vue thermodynamique, le processus économique ne fait que transformer des ressources naturelles de valeur (*i.e.*, de basse entropie ; $VG > 0$) en déchets (de haute entropie ; $VS > 0$). « *Mais, il nous reste à résoudre l'énigme du pourquoi d'un tel processus. Et l'énigme subsistera tant que nous ne verrons pas que le véritable produit économique du processus économique n'est pas un flux matériel de déchets mais un flux immatériel: la joie de vivre* (20) ».

En réalité, cette « joie de vivre » exprime la consommation de masse qui caractérise les pays industrialisés ; on peut, bien sûr, exprimer des réserves quant au choix des mots employés par l'auteur, car il est loin d'être évident que la consommation ou la surconsommation de biens et d'énergie apporte la « joie de vivre ». En revanche, le fonctionnement du cerveau, par le truchement de flux d'informations, est très peu énergivore. Reste à chacun de décider ce qui lui procure le plus de joie de vivre : la lecture des grands philosophes grecs ou la consommation effrénée de biens matériels !

Certains auteurs (comme Philippe Murray) proposent même l'expression de « *distraction de masse* » pour qualifier le mode de vie des pays les plus riches de la Planète, où l'on multiplie les fêtes, exacerbant ainsi à la consommation chez l'*Homo festivus*. Mais cette façon de vivre n'est acceptable ni au plan environnemental ni au plan thermodynamique, car elle détermine une forte pression sur les ressources

(17) C. de Duve, *Une visite guidée de la cellule vivante*. De Boeck Université, 1987, 437 p. Cf. p. 410. Le Professeur Christian de Duve, de l'Université Catholique de Louvain (Belgique), est Prix Nobel de Physiologie.

(18) N. Georgescu-Roegen, *op. cit.*, p. 50.

(19) Dans le cas de la meilleure agriculture, l'efficacité photosynthétique est de l'ordre de 1 % de l'énergie solaire reçue par la plante. Dans les pays où l'agriculture est une industrie (exemple : l'agriculture extensive des pays riches), les rendements moyens n'atteignent que le tiers de cette valeur (0,3 % ou 30×10^{-4}), alors que la base actuelle dans une grande partie du monde est inférieure à 0,1 % (10×10^{-4}). Pour les forêts du globe, l'efficacité photosynthétique est de l'ordre de 0,5 %.

(20) N. Georgescu-Roegen, *op. cit.*, p. 25 : « The enjoyment of life ».

naturelles et réduit concomitamment la capacité d'assimilation de la biosphère pour les déchets que cette excessive consommation génère.

36. De toute façon, nous entrons dans une période où il va falloir modifier profondément les habitudes de consommation et tendre vers la constance des flux d'intrants (F_i) :

$$C_{te} = C_{F_i} < \text{ou} = K_{R-A} \text{ biosphère (21).}$$

Ce flux d'intrants (matière et énergie) n'existe que pour autant qu'il puisse s'alimenter de basse entropie, puisée dans l'environnement (en particulier, les combustibles fossiles, le pétrole, p.ex.). On observe que tout objet présentant une valeur économique (p.ex., un fruit cueilli à un arbre, un vêtement, un meuble) comporte une structure hautement ordonnée, donc de basse entropie.

37. Il y a plusieurs leçons à tirer de cette analyse :

- la première, c'est que la lutte économique de l'homme se concentre sur la basse entropie de son environnement ;
- la seconde, c'est que la basse entropie de l'environnement est rare (non seulement le charbon est rare, mais il ne peut être utilisé qu'une seule fois ; la rareté du sol est différente : il est certes limité, mais réutilisable, pour autant cependant qu'on ne le laisse pas se dégrader.

38. C'est la thermodynamique, avec sa loi de l'entropie, qui reconnaît la distinction qualitative, que les économistes auraient dû faire dès le début, entre les *intrants* qui sont des ressources de valeur (basse entropie) et les déchets sans valeur (haute entropie). Comme nous l'examinerons dans un autre chapitre(22), les deux plus importants problèmes, actuels, de l'environnement résident, d'une part, dans le caractère limité des intrants de basse entropie (K_R biosphère : capacité de régénération de la biosphère) et, d'autre part, dans les limites de la capacité d'assimilation par la biosphère (K_A biosphère) des déchets, résultant de la croissance économique.

II.4 Extension de la notion d'entropie à la matière

39. L'entropie a fini par être considérée comme une mesure de désordre, non seulement de l'énergie mais encore de la matière. La loi de l'entropie, sous sa forme actuelle, stipule que la matière est également soumise à une dissipation irrévocable (23). Nous appliquons, ci-dessous, le second principe de la thermodynamique au processus de l'érosion des sols et aux feux de brousse.

Il faut observer aussi que la notion générale de « déchet » recouvre des réalités très diverses, liées au stade de leur dégradation thermodynamique ; c'est ici que les processus producteurs d'entropie peuvent jouer un rôle constructif (24). Toute la question du recyclage des déchets dérive de cette constatation que l'ordre peut résulter du chaos (Prigogine).

II.4.1 Interprétation thermodynamique des processus érosifs

40. L'érosion du sol peut illustrer cette extension de la notion d'entropie (fig. 10 - 3). Un sol érodé ne subit

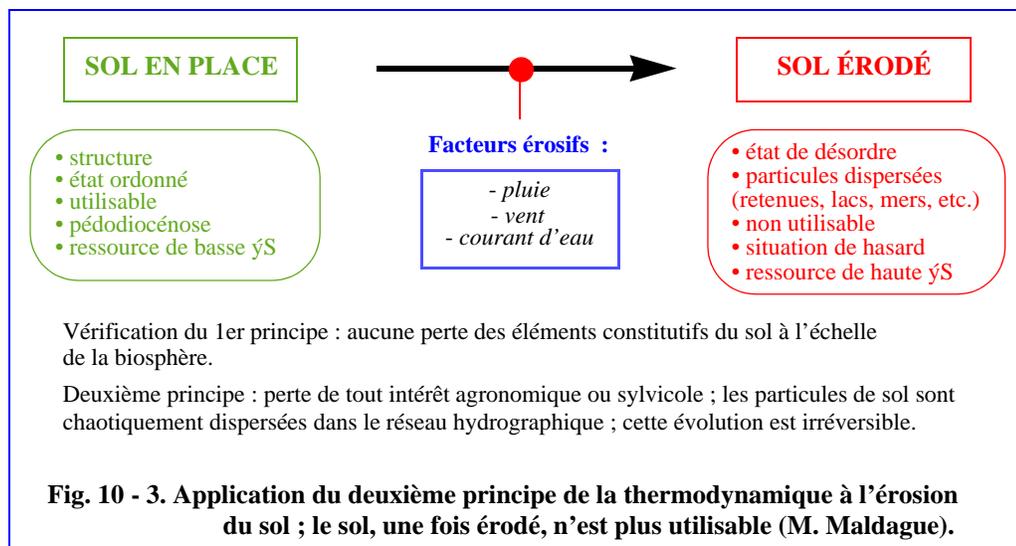
(21) Se référer au fascicule 11, consacré aux implications du développement durable.

(22) Cf. Fascicule 11, *Implications du concept de développement durable. Approche thermodynamique*. - [K_R biosphère] est la capacité de régénération et de production d'intrants de basse entropie par la biosphère, et [K_A biosphère], la capacité d'assimilation et de recyclage de substances de déchet (haute entropie) par la biosphère.

(23) N. Georgescu-Roegen, *op. cit.*, p. 47.

(24) Cf. Note 15.

aucune perte à l'échelle de la biosphère, mais ses éléments constitutifs se trouvent, contrairement à ce que l'on observe dans le cas d'un sol en place, dans un état de désordre, dispersés qu'ils sont dans le réseau hydrographique, dans les retenues et lacs de barrage ou au fond des mers et des océans. Un sol érodé, dont l'entropie est devenue maximale, ne peut plus être utilisé, comme il pouvait l'être lorsqu'il se trouvait dans un état ordonné, dans un état de non-hasard. Un sol en équilibre est une ressource de basse entropie.



II.4.2 Interprétation thermodynamique d'un feu de graminées (feu de brousse)

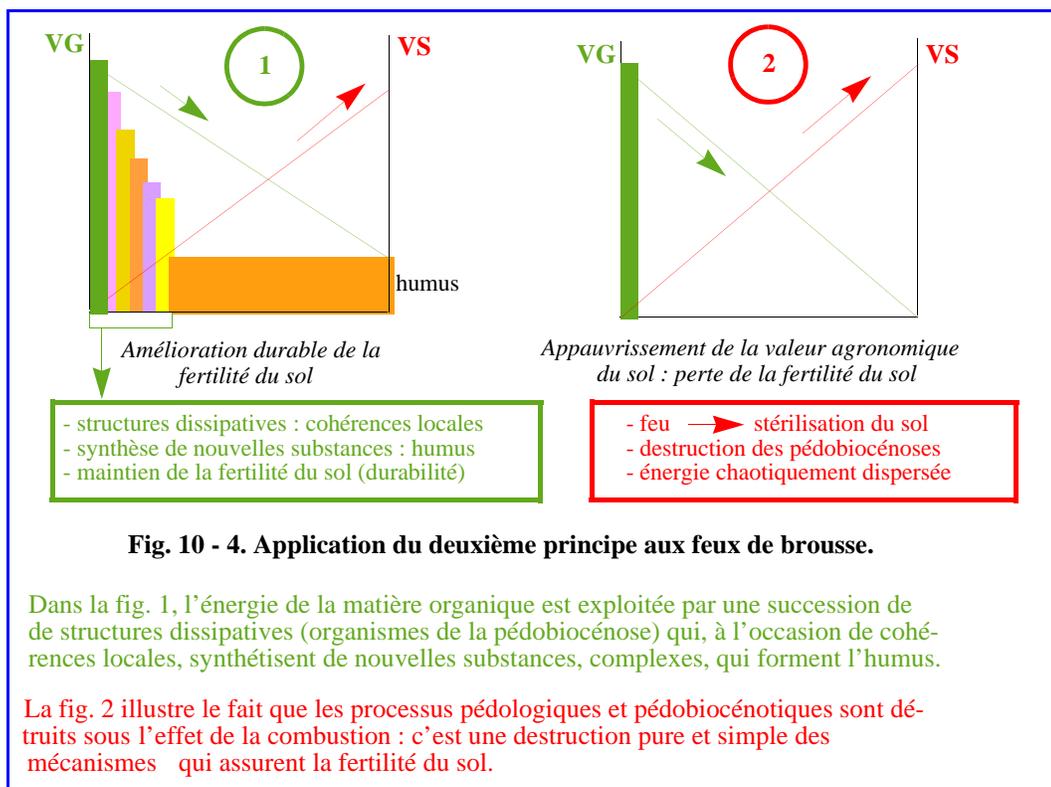
41. On peut donner un autre exemple de l'application, à la matière, du deuxième principe de la thermodynamique, en prenant le cas des feux de brousse (fig. 10 - 4).

. Les graminées sur pied représentent, même en fin de cycle de croissance, lorsque leur contenu en matière azotée digestible est très réduit, une substance de basse entropie que peuvent mettre à profit une succession d'organismes vivants, appartenant à la pédobiocénose (pédofaune et microflore). La dégradation de matériel végétal — ou l'exploitation de l'énergie de ce matériel — par les organismes du sol entraîne, d'une part, une réduction de son énergie libre (VG) avec augmentation concomitante de son entropie (VS), et, d'autre part, la synthèse de nouvelles substances vivantes — organismes de la pédobiocénose, constituants de l'humus, notamment —, autrement dit, l'apparition de *cohérences locales* ; ces organismes ont valeur de *structures dissipatives* : leur croissance, leur ordre, est possible grâce à une destruction, en l'occurrence, la dégradation du matériel végétal.

42. Le travail des organismes animaux, consommateurs de substance végétale (phytophages, saprophages), va ainsi permettre à une série d'autres organismes de la chaîne trophique (saprophages, nécrophages, coprophiles ; décomposeurs microbiens ; champignons ; etc.) d'intervenir, à leur tour, chacun valorisant sélectivement les résidus organiques, abandonnés par les maillons antérieurs de la chaîne trophique. Bref, la destruction totale de la matière organique des graminées considérées se fera de façon graduelle (*i.e.*, par paliers), donnant naissance à toute une série de structures dissipatives (fig. 10 - 4) qui, outre le fait d'assurer la dégradation du matériel végétal, auront des effets bénéfiques sur le sol ; ceux-ci résultent des fonctions propres des organismes intervenant dans les processus de dégradation : amélioration de la structure et de la texture du sol ; amélioration de son état hydrique ; amélioration des échanges gazeux dans le sol ; constitution d'une réserve de matière organique sous forme d'humus ; minéralisation de la matière organique ; etc.

Cas des feux de brousse

43. Cette transformation graduelle du réservoir énergétique (γG), constitué par les graminées, sous l'effet des organismes endogés, contraste avec la destruction brutale à laquelle on assiste dans le cas du passage des feux de brousse (fig. 10 - 4) : non seulement, il n'y a, dans ce cas, aucune intervention de structures dissipatives, ni aucune formation d'humus, mais bien stérilisation des horizons superficiels du sol — avec ses conséquences pédologiques négatives — et destruction de la litière et de l'humus (25).



II.4.3 Information et deuxième principe

44. Le deuxième principe de la thermodynamique s'applique encore, en dehors de l'énergie et de la matière, à l'information. Celle-ci doit être considérée comme de la négentropie : elle permet en effet de construire. Dans un système de production, l'information et la communication jouent un rôle équivalent à celui de l'énergie. Dans l'un comme dans l'autre cas, il s'agit d'intrants de basse entropie.

(25) Cf. M. Maldague, TGET, tome I, fascicule consacré aux feux de brousse.

III. APPLICATION DE LA THERMODYNAMIQUE À LA CRISE DE L'ENVIRONNEMENT

III.1 Introduction

45. La quantité d'énergie accessible, de basse entropie (p.ex., les combustibles fossiles), est limitée. On peut dire, de la même façon, que la quantité de matière accessible, de basse entropie, est également limitée. C'est le caractère limité des intrants de basse entropie qui pose, à l'heure actuelle, avec la capacité limitée de la biosphère à assimiler et à recycler les déchets des activités humaines, les plus grands problèmes mésologiques. C'est pourquoi, comme nous le verrons plus loin, il faudra de plus en plus lier l'avenir énergétique de la Planète au *flux* plutôt qu'au *stock*.

46. On peut admettre que la crise de l'environnement résulte de ce que l'on a négligé jusqu'ici de reconnaître la nature entropique du processus économique. Celui-ci puise, d'une part, dans les sources de basse entropie (à haute énergie libre, $VG > 0$) et rejette, d'autre part, des déchets de haute entropie ($VS > 0$). Ces rejets peuvent, en outre, influencer, à leur tour, les sources de basse entropie, comme c'est le cas des pollutions. Ils sont aussi — et ceci est devenu particulièrement préoccupant, ces dernières années — responsables de certains changements globaux, comme les changements climatiques, avec l'effet de serre et la destruction de la couche d'ozone. L'homme a pu atteindre le développement que l'on connaît — essentiellement dans les pays industriels —, au prix d'un prélèvement considérable dans les sources de basse entropie. Il est en conséquence contraint, actuellement, de faire appel à des ressources terrestres de moins en moins accessibles. En réalité, on atteint les limites de la capacité de la biosphère à produire et à générer des intrants de basse entropie (dépassement de $K_R B$: capacité de régénération de la biosphère). Il n'a pas non plus attaché d'intérêt, sauf depuis quelques années, au problème des effluents liquides, solides et gazeux (dépassement de $K_A B$: capacité d'assimiler les déchets de la biosphère).

47. Le rôle prépondérant, joué dans l'histoire humaine par les ressources naturelles, n'a pas retenu l'attention des économistes orthodoxes (26), pour lesquels de telles ressources — aussi longtemps qu'elles ne sont pas exploitées — n'ont aucune valeur économique. Au demeurant, des civilisations remarquables — celle des Mayas, par exemple — disparurent parce que leurs peuples furent incapables d'émigrer ou de compenser la détérioration de leur milieu par un progrès technique adéquat. Dans le passé, tous les conflits entre les grandes puissances ont eu pour objet le contrôle des ressources naturelles (ressources de basse entropie).

Stock et flux

48. L'énergie libre (VG), à laquelle l'homme peut avoir accès, vient de deux sources distinctes :

- la première est un *stock*, le stock d'énergie libre des dépôts minéraux, situés dans la terre (combustibles fossiles) ;
- la deuxième est un *flux*, le flux du rayonnement solaire, intercepté par la terre.

49. Tandis que l'homme a une maîtrise presque complète du stock, il n'a pas le contrôle du flux du rayonnement solaire. C'est la source terrestre — le stock, c'est-à-dire les combustibles fossiles — qui nous fournit les matériaux de basse entropie avec lesquels nous fabriquons nos biens les plus importants.

50. Quant au rayonnement solaire ($VG_S < 0$), il est la source première de toute vie sur terre, celle-ci étant tributaire de l'assimilation chlorophyllienne. Le stock énergétique terrestre est une petite source en regard

(26) *Ibid.*, p. 44-45.

de celle constituée par le soleil, dont on estime que la vie active durera encore quelque 5 milliards d'années (27). Il faudra, dans l'avenir, faire de plus en plus appel aux sources d'énergie renouvelables, en particulier à l'énergie solaire. Il en va de la durabilité des processus écologiques, essentiels à la vie.

III.2 Thermodynamique et écologie

51. Les lois de la biocénologie (la première et la troisième) montrent que plus un écosystème est organisé, plus il est diversifié, riche en espèces — qui exploitent des niches écologiques spécifiques —, et plus il est stable. La complexité biologique freine l'augmentation de l'entropie, car elle détermine un flux d'énergie et de matière qui tire son origine de l'énergie solaire. On se référera, à titre d'illustration, à l'interprétation thermodynamique des feux de brousse que nous avons faite ci-dessus (fig. 10 - 4).

52. Il est intéressant d'insister sur la cohérence qu'il y a entre les lois fondamentales de la biocénologie et les prescriptions que l'on peut déduire, pour l'aménagement, des principes de la thermodynamique et des lois de la systémique. On se rappellera ici que l'information constitue de la négentropie.

III.3 Aspects thermodynamiques de la dégradation de la biosphère

53. Alors qu'au cours de millénaires (100.000 ans peut être), l'homme a maintenu un équilibre entre les apports et les pertes d'énergie, la deuxième révolution industrielle (vers 1750) a marqué le début de la dégradation énergétique sans précédent de la planète, qui s'est traduite par la diminution brutale de son énergie libre (VG) et par une augmentation concomitante de son entropie (VS). En d'autres termes, on assiste à une réduction progressive des sources d'énergie différenciées que l'homme a héritées du passé. La quantité totale d'énergie restant constante, conformément au premier principe, il se produit, à un rythme accéléré, une évolution de l'énergie dans le sens de sa dégradation, c'est-à-dire de sa transformation en chaleur.

54. Or, cette énergie thermique diffuse, chaotiquement dispersée, ne permet plus de réaliser ce qui était possible lorsqu'elle était diversifiée, c'est-à-dire sous une forme non thermique, comme la litière, l'humus, la tourbe, la lignite, la houille, le charbon, le bois, le pétrole, le gaz naturel, la matière organique du sol et des vases, etc. Il faut se rappeler que la transformation de la chaleur en une autre forme d'énergie obéit au principe de Carnot-Clausius, à savoir qu'au plus l'énergie est dégradée (chaleur dispersée et températures égalisées), au plus le rendement est faible, jusqu'à devenir nul, lorsque l'égalisation des températures est totalement réalisée. Le système atteint alors son état d'équilibre thermique : son entropie (VS) est maximale, et son énergie interne (VE) nulle.

55. Les phénomènes réels sont presque toujours irréversibles parce qu'ils sont généralement accompagnés de frottement, ce qui conduit à une augmentation de l'entropie. «*Toutes ces raisons, écrit Lehninger, font que l'énergie totale de l'univers subit une dégradation constante vers une forme qui ne peut plus effectuer de travail dans des conditions isothermes. Le sort ultime de l'Univers est donc d'atteindre un état parfaitement désordonné.* » (28)

Stabilité des systèmes physiques

56. Tandis que les systèmes physiques connaissent leur plus grande stabilité lorsque leur entropie est maximum, c'est-à-dire lorsque l'énergie interne du système est nulle, c'est l'inverse qui est vrai pour les systèmes vivants dont la stabilité résulte de la complexité même de leur organisation biologique et de la différenciation maximum de l'énergie.

(27) *Ibid.*, p. 31.

(28) A. Lehninger, *op. cit.*, p. 25-26.

Caractères particuliers de la vie

57. La vie est le résultat d'une *apparente* entorse au deuxième principe de la thermodynamique. Il n'en est rien cependant dès lors que l'on considère la Terre, non pas comme un système isolé, mais comme un sous-système qui tire son énergie du rayonnement solaire ($VG_S < 0$), grâce à la synthèse chlorophyllienne qui permet la réactivation de la matière inerte ; c'est là le processus néguentropique, propre aux végétaux. En conditions naturelles, l'équilibre se maintient pour trois raisons essentielles :

1° l'écosystème terrestre est branché sur l'énergie solaire ; grâce à leur fonction chlorophyllienne, les végétaux sont capables de transformer l'énergie radiante du soleil en énergie chimique ; c'est la photosynthèse (néguentropie) ;

2° les systèmes biologiques sont cycliques : « *On fait du marbre avec de la chair et de la chair avec du marbre* » (Diderot). On peut dire aussi que du désordre naît l'ordre (cf. *supra*) ;

3° les processus biologiques exploitent les sources d'énergie de façon économe (grâce à un enchaînement, une succession, de cohérences locales).

C'est le caractère cyclique des systèmes vivants qui garantit leur pérennité ; encore faut-il pour cela que l'on s'assure du maintien des systèmes entretenant la vie et des conditions nécessaires à la persistance des processus écologiques essentiels.

58. L'application de la thermodynamique à l'écologie fournit des bases solides et irréfutables à l'observation de la dégradation de la biosphère.

III.4 Exploitation des sources d'énergie conventionnelle

[épuisement des stocks énergétiques]

59. La société humaine, surtout depuis la deuxième révolution industrielle, ne cesse d'exploiter, à un rythme exponentiel, les ressources du globe dont l'entropie augmente, ce qui entraîne, par voie de conséquence, une diminution du potentiel énergétique de la planète [par suite de l'épuisement des stocks et de la multiplication des atteintes aux mécanismes qui exploitent les flux], et risque de restreindre les possibilités d'action de l'homme — les marges de manœuvre se réduisent par suite du dépassement des limites — et de conduire à court terme à un goulet d'étranglement sur plusieurs plans.

60. Si l'on continue dans cette voie, l'on risque de se trouver, chaque jour qui passe, dans une situation un peu plus précaire, car on disposera de moins en moins d'énergie diversifiée et de plus en plus de chaleur inutilisable (résultant de la pollution thermique et du réchauffement du globe par effet de serre), sans compter que ce gaspillage énergétique entraîne une foule d'autres conséquences, liées à l'emprise brutale, exercée par l'homme sur les ressources. S'il poursuit ce qu'il a entrepris, l'homme aura réussi cette prouesse d'avoir pu consommer en quelques décennies des ressources énergétiques, accumulées durant toute une époque géologique (29), et d'avoir ainsi réduit à tout jamais la marge de manœuvre de l'espèce humaine, limitant les options de l'avenir. Cet aspect du problème de l'énergie, illustré par l'utilisation des combustibles fossiles, non renouvelables, correspond au volet entropie de la grande loi cosmique, dont le second volet, la néguentropie, mérite de retenir également l'attention.

61. Si nous étions en mesure d'exploiter, dès à présent, sur une échelle suffisante, les ressources diversifiées

(29) C'est durant le Carbonifère, époque géologique de la fin de l'ère primaire, allant du Dévonien au Permien (soit durant 60 millions d'années) que la flore, qui comprenait des Cryptogames et des Gymnospermes de taille gigantesque, a formé des débris qui, accumulés dans les régions lacustres, ont donné les combustibles fossiles (charbon, houille, pétrole, gaz).

des énergies non conventionnelles (les énergies solaire et éolienne en particulier), nous pourrions compenser, sur plusieurs plans, la diminution rapide des combustibles fossiles, freiner le rythme d'augmentation de l'entropie du globe et nous prémunir contre d'autres conséquences que l'utilisation de ces combustibles entraîne, comme la pollution de l'air, l'effet de serre et le réchauffement de la Terre qui en résulte.

III.5 Impacts sur les transformateurs d'énergie solaire

[dégradation des mécanismes néguentropiques]

62. Il convient de se pencher cette fois sur la situation des mécanismes qui assurent la transformation photosynthétique (30) de certaines radiations solaires en énergie chimique. L'homme — « animal hétérotrophe » — est tributaire des végétaux autotrophes (premier niveau biotique). Une plante a besoin, pour vivre, d'un substrat (sol ou eau), d'eau, de gaz carbonique, d'éléments minéraux et de rayonnement de longueur d'onde bien déterminée. Or que se passe-t-il sur ce plan depuis quelques décennies ?

63. Le pillage des ressources de la planète ne cesse de se poursuivre. Il suffit pour s'en convaincre de prendre connaissance des *Rapports sur l'état de l'environnement mondial* rendus publics, le 5 juin de chaque année (31), par le directeur exécutif du PNUE. Cette utilisation irrationnelle des ressources biosphériques a pour résultat une augmentation, sans cesse accélérée, de l'« *astreinte écologique* » (32) qui se manifeste de trois manières :

- 1° la destruction directe des grands transformateurs naturels d'énergie ;
- 2° la destruction indirecte des grands transformateurs naturels d'énergie et son impact sur le climat du globe ;
- 3° le dysfonctionnement des systèmes artificialisés, par absence de recyclage.

III.5.1 Destruction directe des grands transformateurs naturels d'énergie (forêts)

64. La destruction des forêts — et singulièrement celle des forêts tropicales — et des autres formations végétales est non seulement grave en soi, mais elle entraîne, très généralement, de dramatiques conséquences, en termes de pertes de sols fertiles, par l'érosion — cancer de notre planète —, et de modifications des régimes pluviométriques et hydrographiques. On peut illustrer ce point en invoquant la savanisation et la désertification croissantes de la planète. Or, sans sol et sans eau, pas de croissance végétale ; en absence d'autotrophie, pas d'hétérotrophie.

Cas des pays en développement

65. Ces angoissantes dévastations des écosystèmes ne cessent de s'amplifier, contraignant la population des régions affectées à une existence dominée par la lutte pour la survie. Dépendant de l'énergie solaire pour la majeure partie de ses besoins, une fois le transformateur de cette énergie — à savoir les écosystèmes naturels, modifiés ou transformés —, hors d'état de fonctionner, la population est condamnée à des conditions de vie particulièrement difficiles et aléatoires ; dans les cas extrêmes, la vie n'est plus possible et la population se trouve contrainte à l'exode (p.ex., les réfugiés de l'environnement). On rappellera la grave

(30) L'élaboration glucidique par les plantes vertes, comme la complexification des formes par l'évolution biologique, sont le témoignage des capacités néguentropiques de la vie.

(31) Le 5 juin a été proclamé « *Journée mondiale de l'environnement* » par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE).

(32) L'astreinte écologique est « *la totalisation des astreintes infligées par l'homme à l'environnement, tant en extraction de ressources qu'en rejet d'effluents* ». Réf. E. Goldsmith, R. Allen, M. Allaby, J. Davull et S. Lawrence, *Changer ou disparaître*. Collection Écologie, Fayard, 158 p., 1972.

décennie de sécheresse qui a sévi au Sahel, de 1974 à 1984 et qui a suscité, en 1977, la *Conférence des Nations Unies sur la Désertification*.

Cas des pays industriels

66. Ce type de dégradation fondamentale — car dans une large mesure irréversible — n'est pas le seul fait des pays en développement ou situés dans l'hémisphère Sud. Les pays occidentaux n'ont-ils pas été les premiers, et sur une grande échelle, à détruire leur milieu de vie [que l'on se rappelle les vastes dégradations des forêts, des sols et de la faune qui ont affecté les États-Unis au cours du XIX^e siècle]. Ces pays peuvent cependant composer, dans une certaine mesure, avec leurs dégradations, et ils ont relativement facile à le faire, parce qu'ils se trouvent dans un environnement biophysique qui se caractérise par une relative résistance aux atteintes infligées, et cela, pour des raisons climatiques et pédologiques. Ils ont en outre les moyens — grâce à leurs connaissances (information organisée ; néguentropie) et à leurs ressources économiques — de se substituer, partiellement toutefois, et de façon précaire et temporaire, aux mécanismes naturels qu'ils perturbent.

67. Cependant la réaction compensatrice s'est faite, en général, suivant la voie de la facilité — autre expression de l'entropie croissante. En effet, ce qui ne pouvait plus être tiré des systèmes naturels, par suite de la perturbation des mécanismes écologiques ou par négligence (absence de recyclage, par exemple), a été remplacé par des systèmes, de plus en plus artificialisés, qui impliquaient que l'on puisât sans mesure dans les réservoirs de matière et d'énergie, hérités des époques antérieures. Cette énergie fossile, qui paraissait inépuisable, permettait de substituer aux mécanismes naturels, des agrosystèmes artificiels, très productifs, du fait de l'important apport énergétique introduit dans le système, sous forme d'engrais chimiques, de pesticides, de sélection génétique des plantes de cultures, de mécanisation poussée à tous les stades de la production, d'irrigation, etc.

68. En fait, le passage de l'équilibre naturel à un équilibre artificialisé s'est réalisé au prix du puisage dans le stock énergétique, dont on se soucie fort peu, en outre, de mesurer les limites. L'utilisation aberrante des mécanismes naturels de production a conduit, à son tour, à augmenter brutalement l'entropie, ce qui nous ramène au cas précédent. De fait, les systèmes de production, constitués par les écosystèmes naturels transformés, sont devenus tributaires, eux aussi, et parfois dans une très large mesure, de sources énergétiques finies.

III.5.2 Destruction indirecte des grands transformateurs naturels d'énergie et impact sur le climat du globe

69. Le rejet dans l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère, en un mot, dans la biosphère, de substances résiduelles (déchets solides, eaux vannes, effluents gazeux, substances toxiques, etc.) est susceptible d'influencer négativement le métabolisme des organismes et des systèmes vivants. Les innombrables substances chimiques qui résultent de la technologie moderne ont profondément affecté les équilibres écologiques et perturbé les échanges au sein des chaînes trophiques dont l'homme dépend, tout en affectant, de surcroît, ce dernier directement. Citons, à titre d'exemples, le problème des précipitations acides, la pollution des eaux, de l'air et du sol, la pollution par le bruit, la dégradation de la biodiversité (disparition d'espèces végétales et animales), l'érosion des sols, la déforestation et la désertification, les changements climatiques, que l'on range parmi les changements globaux.

L'ampleur de ces atteintes est telle que certaines se répercutent, à l'heure actuelle, au niveau de la troposphère, comme, p.ex., l'effet de serre et la destruction de la couche d'ozone qui entraînent des changements climatiques sensibles.

III.5.3 Dysfonctionnement des systèmes artificialisés par absence de recyclage

70. Tandis que le fonctionnement des écosystèmes naturels comprend la minéralisation de la matière organique — synthétisée au cours de la phase anabolique —, grâce à laquelle se referme le cycle de la matière (voir fig. 2 - 5), les systèmes de production de l'homme ont ignoré jusqu'à présent, sauf en de rares circonstances, le recyclage organisé de leurs déchets. Dans certains pays industrialisés, on commence, cependant, depuis quelques années, en milieu urbain, à procéder au ramassage sélectif des déchets domestiques.

71. L'absence de recyclage a notamment pour conséquence un accroissement des charges polluantes dans les eaux, ce qui entraîne, fréquemment, un dépassement de la capacité auto-épuratrice des systèmes aquatiques, et, subséquemment, des ruptures d'équilibre écologique. Elle entraîne également l'accumulation, tant dans les sols que dans les eaux, de substances toxiques qui peuvent être préjudiciables aux écosystèmes et à la santé humaine.

72. Quant à l'incinération des déchets solides biodégradables et aux feux de brousse, ils court-circuitent le cycle naturel de la minéralisation, et contribuent à l'augmentation de l'entropie, à la pollution thermique, à l'effet de serre et à la dégradation des sols. Sont particulièrement préoccupants les effluents gazeux — CO_2 , CH_4 , NO_x , CFC, etc. — par suite des changements globaux qu'ils déterminent et qui affectent la capacité de recyclage et d'assimilation de la biosphère (K_A biosphère).

III.6 Conclusion

73. Il est possible de dégager de ce qui précède une observation générale, à savoir que les problèmes de l'environnement sont universellement distribués, et cela, indépendamment du degré de développement atteint par les différents pays, blocs ou régions. Ils se manifestent sur le plan thermodynamique :

- 1° par un accroissement brutal de l'entropie du globe, conséquence du pillage inconsidéré des réserves d'énergie fossile [stock] ;
- 2° par un mésusage des capacités néguentropiques de la biosphère [flux] (destruction des forêts tropicales) ;
- 3° par le dépassement de la capacité d'assimilation et de recyclage (K_A) de la biosphère ;
- 4° par les atteintes aux processus dont dépend la capacité de production et de régénération de substances de basse entropie (K_R) par la biosphère ; le problème des ressources naturelles renouvelables acquiert ainsi un caractère de particulière gravité.

Ces divers impacts convergent vers un même résultat : la dégradation accélérée de la biosphère et les atteintes à la capacité sustentatrice de la biosphère pour la vie humaine. Une telle évolution n'est pas durable.

74. En réalité, il n'est pas très angoissant pour notre espèce de constater l'accélération de l'entropie de l'Univers. À cette échelle, il n'y a pas lieu de s'inquiéter puisque l'énergie libre du Soleil (γG_S) permet un approvisionnement énergétique pour quelque 5 milliards d'années encore.

75. Mais il n'en va pas de même de la Terre, système branché sur le Soleil. La Terre voit s'accroître l'accroissement de son entropie. Les mécanismes néguentropiques se dégradent ; les stocks énergétiques s'épuisent ; de grandes modifications macro-climatiques — destruction de la couche d'ozone ; accentuation de l'effet de serre ; désertification ; réchauffement climatique, etc. — se manifestent (ce sont là des aspects

du *changement global*). La biodiversité se restreint. Les marges de manœuvre de l'humanité se réduisent par suite des atteintes et du dépassement des limites. Et, dans l'ensemble, l'insouciance continue à prévaloir. Pour satisfaire une croissance quantitative et la surconsommation de masse — encore pourrait-on s'interroger sur les rapports entre le gaspillage énergétique et ces objectifs —, on est en train de menacer, voire de sacrifier, irréversiblement, certains des fondements essentiels de la vie sur la Terre, à savoir les capacités de celle-ci à produire des intrants de basse entropie et à recycler les effluents de haute entropie. Le problème des limites se pose. La société humaine suit-elle une voie compatible avec la Civilisation ? L'homme se comporte-t-il comme on aurait pu espérer que se comportât *Homo sapiens sapiens* ? •